

西南交通大学本科毕设中期答辩 ▶

# 基于差异化路径信息推荐的城市 交通网络均衡优化研究

- 研究目标
- 当前进展
- 答辩总结

指导教师：徐占东      答辩学生：何俊锋

夙实扬华 自强不息



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

# 1 研究目标

**现实问题：**城市道路网络交通拥堵时间长、影响大



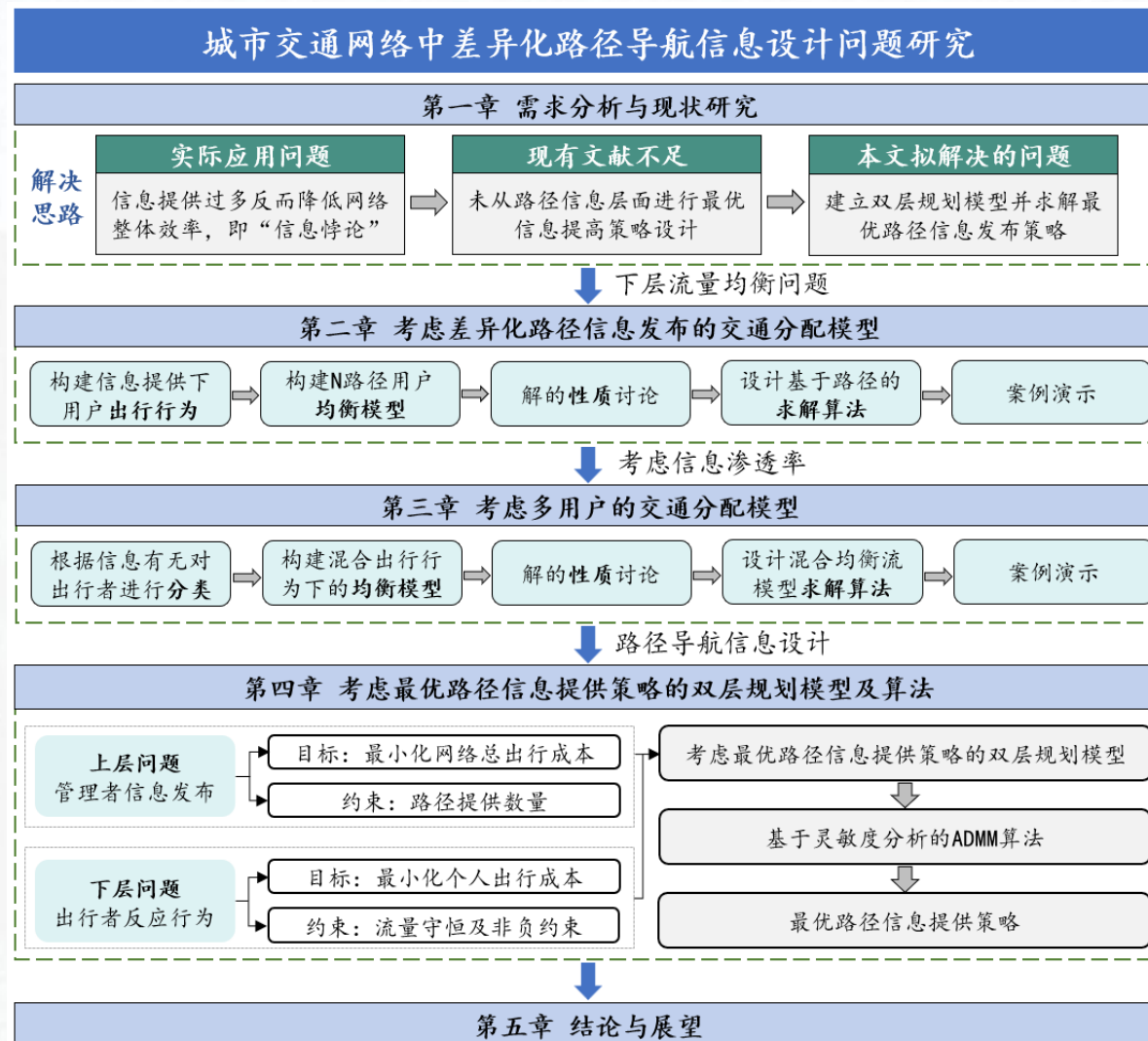
**已有措施：**向出行者提供路径信息以避免拥挤路段



**潜在问题：**不恰当的信息提供反而降低总出行效率<sup>[1]</sup>



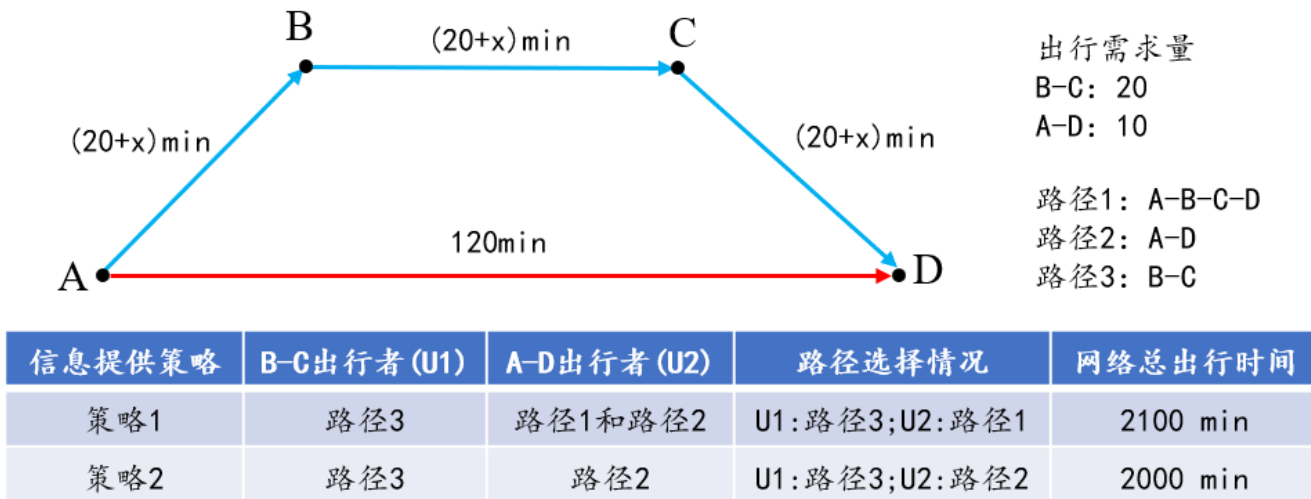
**研究目标：**设计面向系统优化的路径信息推荐策略



[1] Acemoglu D, Makhdoumi A, Malekian A, et al. Informational Braess' paradox: The effect of information on traffic congestion[J]. Operations Research, 2018, 66(4): 893-917.

# 1 研究目标

**信息悖论 (Informational Braess' Paradox) :** 向出行者提供更多的路径信息, 反而降低网络出行效率。



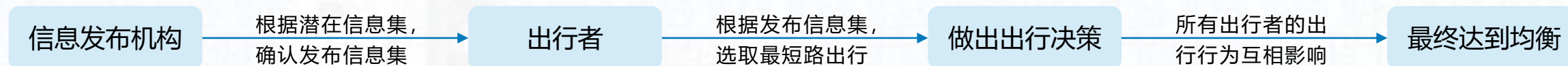
- 向从点A出发到点D的出行者只提供路径2的信息时, 网络总出行时间为2000分钟。
- 向该出行者多提供路径1的信息时, 网络总出行时间反而增加了100分支。
- 一种解释: 信息提供过多, 降低了次优路径分散网络流量的作用<sup>[2]</sup>。
- 研究最终目标: 将该问题转化为双层规划问题, 求解获得最优信息推荐策略。



## 2 当前进展

### 1.考虑差异化路径信息发布的交通分配模型及求解算法

#### 1.1 网络供给侧与需求侧的关系:



#### 1.2 RUE(Restricted user equilibrium):

如果网络处于RUE状态, 则表明所有起讫点间的出行者都无法在各自的路径集中找到出行时间更短的路径。

#### 1.3 在用户均衡状态下使用K最短路算法获取潜在路径集 $\Pi^{r,s}$ :

算法 1: K 最短路算法求解潜在路径集<sup>①</sup>

```
1: Input: ①
2: Network  $G(N, A)$ , UE link flows  $x_a, a \in A$ , maximum size  $k$  of path set. ②
3: Output: ③
4: Potential path set  $\Pi^{r,s}, \forall r, \forall s$  ④
5: for  $(r, s) \in (R, S)$  do ⑤
6:   Set  $A = [], B = [], C = []$ . Obtain the shortest path  $\pi$  between origin  $r$  and destination  $s$ . Set  $A = [A, \pi], C = [C, \pi]$ . ⑥
7:   while  $|A| < k$  do ⑦
8:     Find the last path  $\pi'$  in  $A$ , set  $X$  as the links constituting path  $\pi'$ . ⑧
9:     for  $x \in X$  do ⑨
10:      Find the tail node  $n$  of link  $x$ . ⑩
11:      Calculate the cost from  $r$  to  $x$  along path  $\pi'$ . ⑪
12:      Obtain the shortest path  $\pi$  from  $x$  to  $s$  without traversing the links or nodes that are part of the path from  $r$  to  $x$  along  $\pi'$ . ⑫
13:      if  $\pi$  does not exist, then start another iteration. ⑬
14:      else ⑭
15:        if  $\pi \in C$ , start another iteration ⑮
16:        else set  $B = [B, \pi]$  and  $C = [C, \pi]$ . ⑯
17:      end if ⑰
18:    end if ⑱
19:  end for ⑲
20:  if  $|B| = 0$ , then there's no  $k$  shortest path from  $r$  to  $s$ , terminates. ⑳
21:  else extract the shortest path  $\hat{\pi}$  among  $B$  and set  $A = [A, \hat{\pi}]$ . ㉑
22:  end if ㉒
23: end while ㉓
24: Set  $\Pi^{r,s} = A$  ㉔
25: end for ㉕
26: return  $\Pi^{r,s}, \forall r, \forall s$  ㉖
```

#### 1.4 考虑模型所需约束:

(a)流量守恒约束

$$\sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} = q^{r,s}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S$$

(b)流量非负约束

$$h_{\pi}^{r,s} \geq 0, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s}$$

(c)信息提供约束

$$\tau_{\pi}^{r,s} h_{\pi}^{r,s} = 0, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s}$$

(d)路径流量和路段流量关系式

$$x_a = \sum_{r,s} \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} \delta_{a\pi}^{r,s}, \quad \forall a \in A$$

### 1.考虑差异化路径信息发布的交通分配模型及求解算法

#### 1.5 构建底层模型--特定信息推荐策略下的网络均衡流量分布:

$$\begin{aligned} \min Z(\mathbf{x}) &= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ \text{subject to} \\ \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} &= q^{r,s}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S \\ h_{\pi}^{r,s} &\geq 0, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s} \\ \tau_{\pi}^{r,s} h_{\pi}^{r,s} &= 0, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s} \\ x_a &= \sum_{r,s} \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} \delta_{a\pi}^{r,s}, \quad \forall a \in A \end{aligned}$$

#### 1.6 分析模型解特性:

##### 1.6.1 解的唯一性

可行域组成的集合为凸集合 (Convex set)

目标函数的Hessian矩阵为正定矩阵, 即目标函数为凸

目标函数和可行域均具有凸性质, 可得最优解唯一

##### 1.6.2 最优性条件

获取对应的拉格朗日函数:

$$L(\mathbf{h}, \mathbf{U}, \mathbf{V}) = Z[X(\mathbf{h}_{\pi}^{r,s})] + \sum_{r,s} U^{r,s} \left( q^{r,s} - \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} \right) + \sum_{r,s} \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} V_{\pi}^{r,s} (0 - \tau_{\pi}^{r,s} h_{\pi}^{r,s})$$

根据线性规划理论可得:

$$h_{\pi}^{r,s} \cdot \frac{\partial L(\mathbf{h}, \mathbf{U}, \mathbf{V})}{\partial h_{\pi}^{r,s}} = 0, \quad \forall r, s, \pi$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{h}, \mathbf{U}, \mathbf{V})}{\partial h_{\pi}^{r,s}} \geq 0, \quad \forall r, s, \pi$$

进而得到:

$$h_{\pi}^{r,s} \cdot [C_{\pi}^{r,s} - (U^{r,s} + V_{\pi}^{r,s} \tau_{\pi}^{r,s})] = 0, \quad \forall r, s, \pi \in \Pi^{r,s}$$

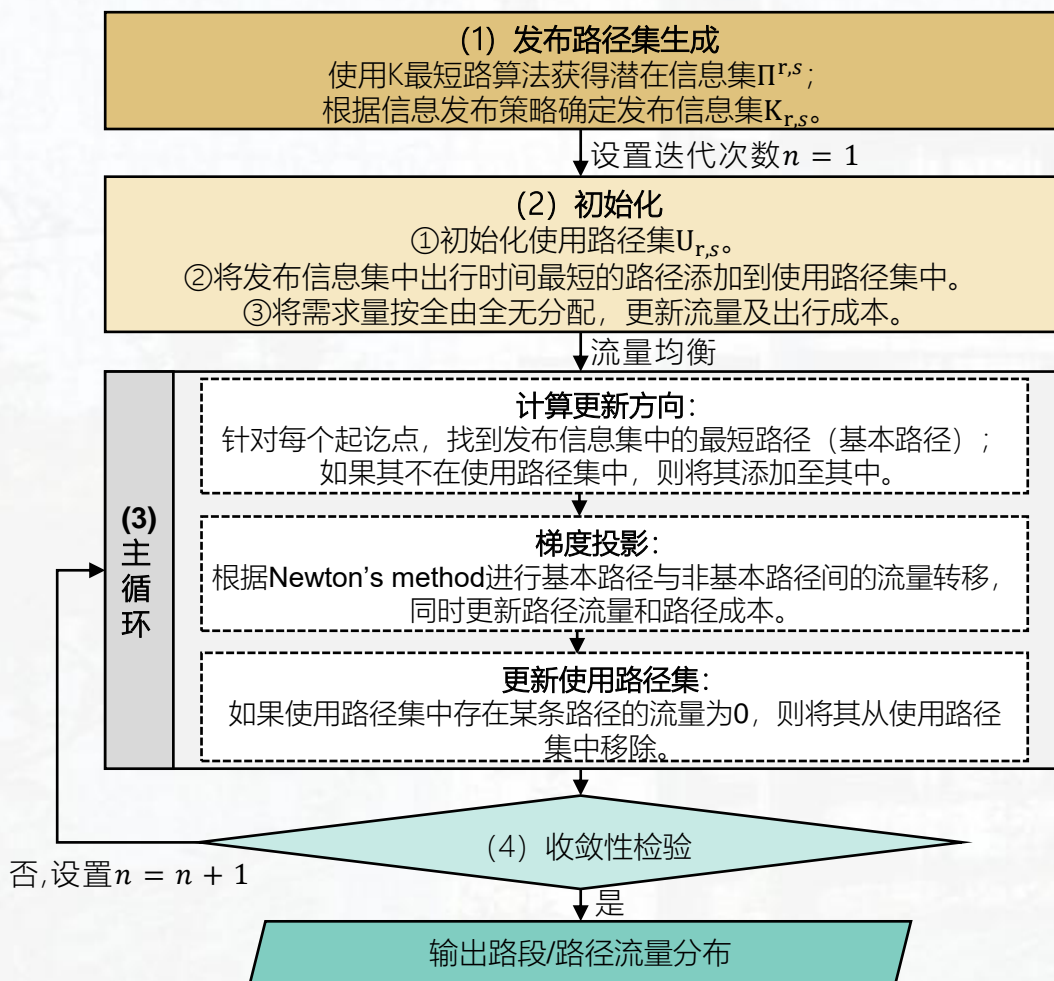
$$C_{\pi}^{r,s} - (U^{r,s} + V_{\pi}^{r,s} \tau_{\pi}^{r,s}) \geq 0, \quad \forall r, s, \pi \in \Pi^{r,s}$$

分析可得, 上述结果实际上阐述了RUE原则, 模型的最优解与RUE条件**具有一致性**。

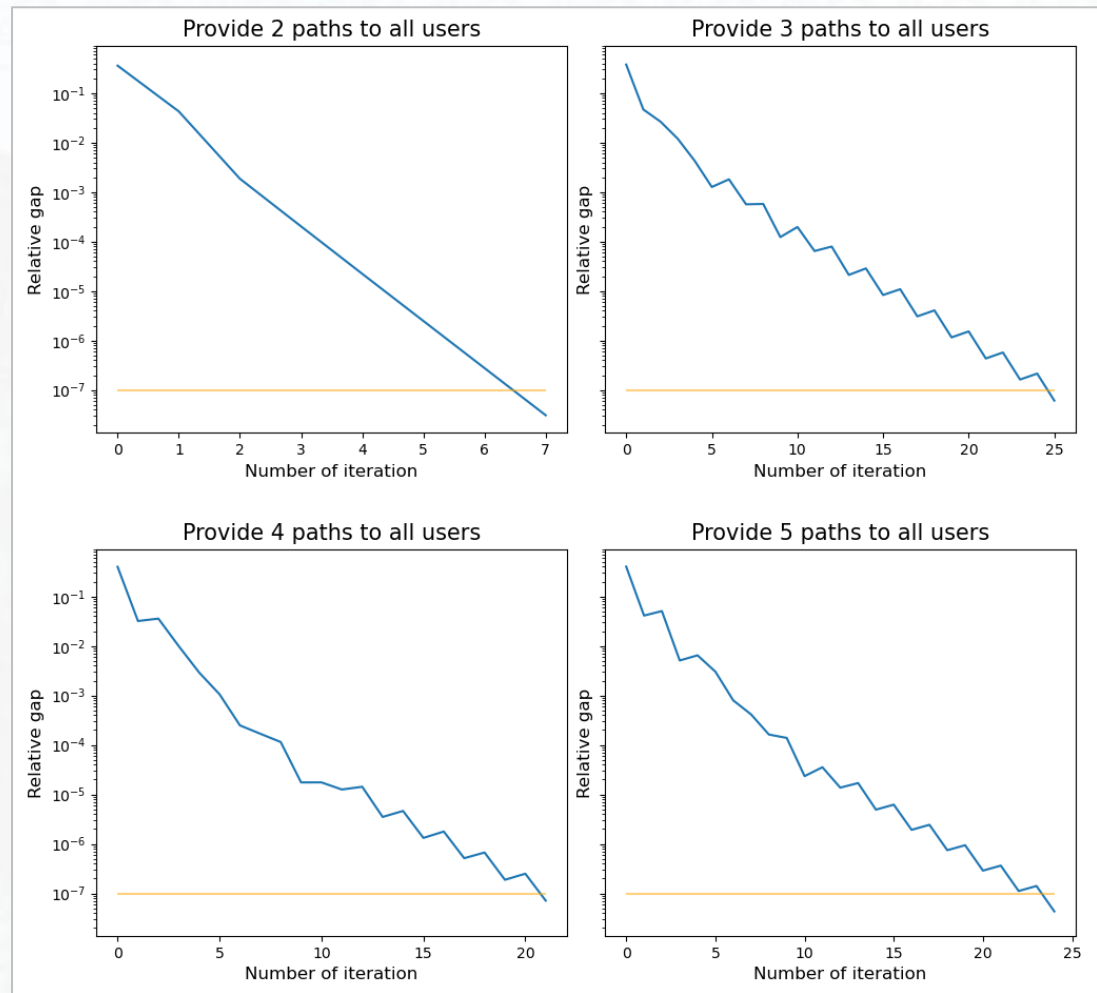
## 2 当前进展

### 1. 考虑差异化路径信息发布的交通分配模型及求解算法

#### 1.7 开发基于路径的求解算法:



算法收敛效果 (Nguyen-Dupuis网络, 13个节点、19条弧):



### 2.考虑最优路径信息提供策略的双层规划模型及算法

#### 2.1 对应模型:

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{x}, \tau) &= \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a) \\ s.t. \quad &\begin{cases} \sum_{\pi \in \Pi_u^{r,s}} (1 - \tau_{\pi}^{r,s}) \geq l & \forall r \in R, \forall s \in S \\ \sum_{\pi \in \Pi_u^{r,s}} (1 - \tau_{\pi}^{r,s}) \leq u & \forall r \in R, \forall s \in S \end{cases} \end{aligned}$$

where  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\tau)$  is implicitly determined by:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}, \tau) &= \sum_{a \in A} \int \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} \delta_{a,\pi}^{r,s} h_{\pi}^{r,s} t_a(x) dx \\ s.t. \quad &\begin{cases} \sum_{\pi \in \Pi^{r,s}} h_{\pi}^{r,s} = q^{r,s}, & \forall r \in R, \forall s \in S \\ h_{\pi}^{r,s} \geq 0, & \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s} \\ \tau_{\pi}^{r,s} h_{\pi}^{r,s} = 0, & \forall r \in R, \forall s \in S, \forall \pi \in \Pi^{r,s} \end{cases} \end{aligned}$$

#### 2.2 当前求解算法:

双层规划求解难点在于:

- ①非凸性
- ②NP难

精确算法难以求解大规模网络;

本文目前使用**模拟退火 (Simulated Annealing)** 算法进行求解。

##### 参数设定:

初始温度: 300

前、后期降温速率: 0.9995和0.995


马尔可夫链长度: 30

迭代次数: 90000

干扰策略: 块干扰+多点干扰+单点干扰

停止迭代温度: 0.01

初始可行解: 向所有出行者都只提供两条路径

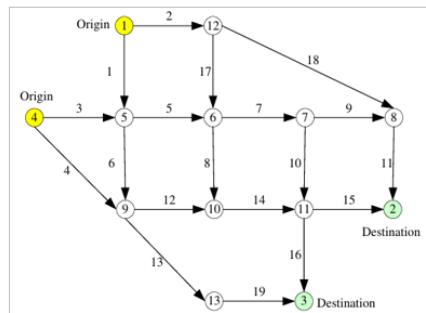
```
461 
462 class SimulatedAnnealing:  # HJF
463     > def __init__(self, net, initial_solution=None):...
466
467     @staticmethod 1 usage  # HJF
468     > def single_point_disruption(ppn):...
478
479     @staticmethod 1 usage  # HJF
480     > def multi_point_disruption(ppn):...
491
492     > def block_disruption(self, ppn):...
504
505     > def run(self):...
```

## 2 当前进展

### 2.考虑最优路径信息提供策略的双层规划模型及算法

#### 2.3 求解结果:

##### 2.3.1 网络拓扑结构以及道路参数



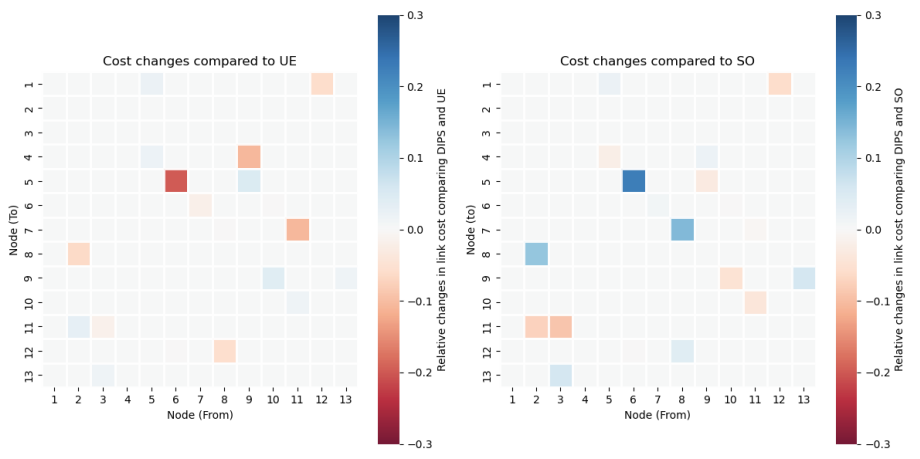
O/D	2	3
1	900	300
4	300	700

Travel demand for each OD pair

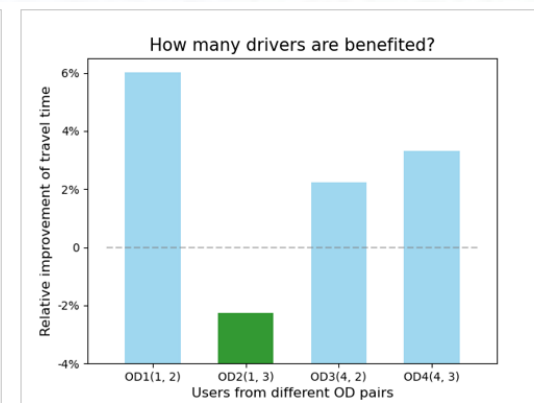
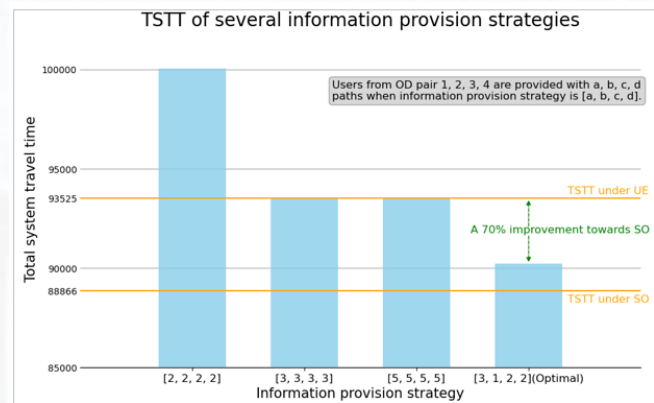
O-D	Route	Node sequence	O-D	Route	Link sequence
(1, 2)	1	1-12-8-2	(1, 3)	6	1-5-9-13-3
	2	1-5-6-7-8-2		7	1-5-6-7-11-3
	3	1-5-6-7-11-2		8	1-5-9-10-11-3
	4	1-5-9-10-11-2		9	1-12-6-7-11-3
	5	1-12-6-7-8-2		10	1-5-6-10-11-3
(4, 2)	11	4-9-10-11-2	(4, 3)	16	4-9-13-3
	12	4-5-6-7-8-2		17	4-9-10-11-3
	13	4-5-6-7-11-2		18	4-5-9-13-3
	14	4-5-9-10-11-2		19	4-5-6-7-11-3
	15	4-5-6-10-11-2		20	4-5-9-10-11-3

Potential path set for each OD pair

##### 2.3.2 道路流量变化



##### 2.3.3 网络改善程度



OD pair	(1, 2)	(1, 3)	(4, 2)	(4, 3)
Shortest travel time under UE	42.95	42.39	42.54	41.97
Shortest travel time under OIPS	40.37	43.35	41.59	40.58

The shortest travel time for each OD pair under user equilibrium(UE) and optimal information provision strategy(OIPS) flow pattern

#### 结论:

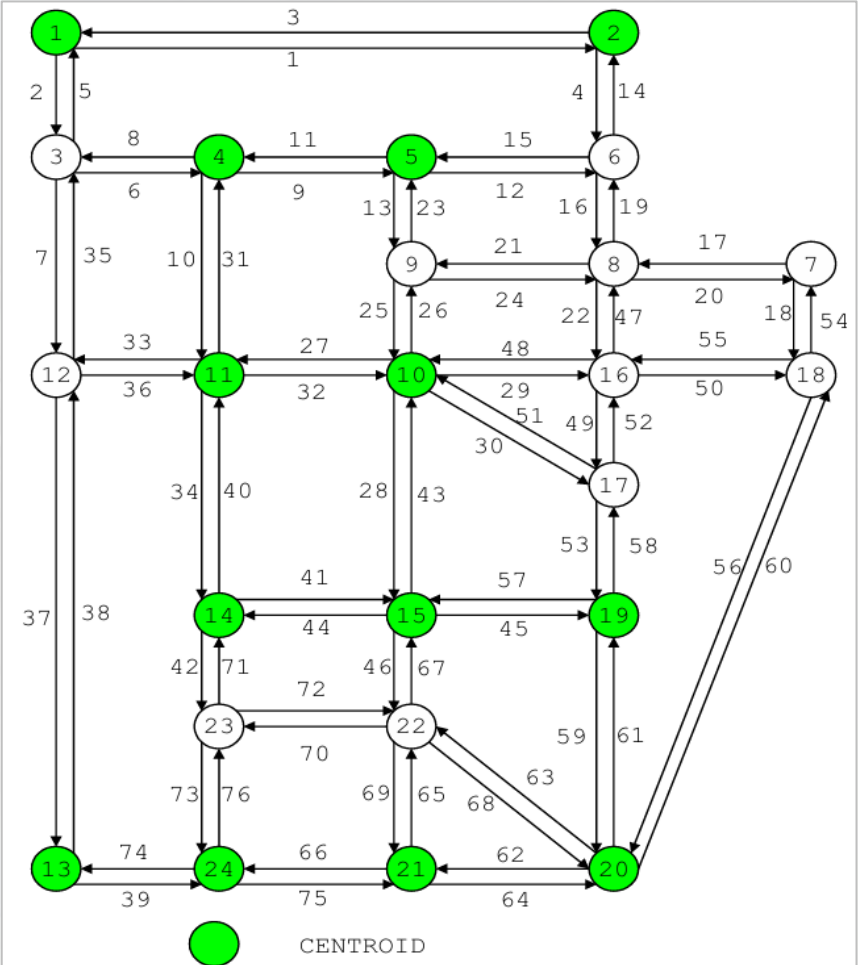
- ①规避了“信息悖论”。
- ②网络可能会大幅度向最优状态偏移。
- ③略微牺牲可以换取网络效率显著提高。



后续研究计划：

- ①将底层模型调整为混合均衡问题
- ②在更大的交通网络中进行数值实验(如Sioux Falls)
- ③设计启发式算法求解双层规划模型

时期(一期为5天) 研究内容	4月				5月			
	3	4	5	6	1	2	3	4
构建混合流均衡模型								
设计启发式算法								
在大中型网络中进行数值实验								
论文撰写								



Sioux Falls网络拓扑结构



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

# 望各位评委老师批评指正

指导教师: 徐占东

答辩学生: 何俊锋